

AFRP メッシュとビニロン短繊維混入吹付けコンクリートを併用した補強工法による RC はりの耐力向上効果

Upgrading effect of RC beams strengthened using
AFRP mesh together with Vinylon short-fiber mixed shotcrete

田口史雄*, 三上 浩**, 岸 徳光***, 栗橋祐介****, 吉田 行*****

Fumio Taguchi, Hiroshi Mikami, Norimitsu Kishi, Yusuke Kurihashi and Susumu Yoshida

*北海道開発土木研究所室長 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

**博(工) 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

***工博 室蘭工業大学教授 工学部 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

****博(工) 北海道開発土木研究所研究員 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

*****修(工) 北海道開発土木研究所研究員 材料研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

In this paper, in order to develop a rational strengthening method for existing concrete structures, the method using AFRP mesh together with Vinylon short-fiber mixed shotcrete was proposed, and its flexural strengthening effect for RC beams was experimentally discussed. Here, static loading tests of T-shaped RC beams strengthened applying the proposed method were conducted taking AFRP mesh volume as variable. The results obtained from this experiment are as follows; 1) flexural strengthening effects for RC beams in case using proposed method is almost similar to those in case using FRP sheet bonding method; 2) shotcrete is debonded due to peeling action of concrete block formed in the lower cover concrete area in the equi-shear span; 3) debonding behavior of shotcrete is similar to that of FRP sheet in flexural strengthening RC beam, so that a prediction method for failure mode of the RC beams strengthened with FRP sheet can be applied for the case using the proposed method.

Key Words : RC beam, AFRP mesh, short-fiber mixed shotcrete, Vinylon short-fiber, load-carrying capacity

キーワード : RC はり, AFRP メッシュ, 短繊維混入吹付けコンクリート, ビニロン短繊維, 耐荷性能

1. はじめに

近年, 既設コンクリート構造物の経年劣化等によるコンクリートの剥離・剥落が相次いで発生し, 第3者に影響を及ぼしたケースも報告されている. また, コンクリートの強度低下や鉄筋の腐食に伴う断面欠損によって構造物の耐荷性能が著しく低下する場合もある. このような劣化損傷を受けたコンクリート構造物の補修補強工法としては, 鋼板もしくは連続繊維 (FRP) シートを接着する工法^{1),2)}の他, 最近では鉄筋等を配置してポリマーセメントモルタルを吹付ける工法³⁾も提案されている. しかしながら, これらの工法において, 1) 鋼板や鉄筋を用いる場合には, 補強材の防錆処理が必要となること, 2) FRP シート接着工法の場合には, 前処理として不陸修正パテによるシート接着面の平滑化およびプライマー塗布などの表面処理工程が必要になること, 3) 不陸修正パテやシート接着用の含浸樹脂, およびポリマーセメントモルタルが比較的高価であること, などが課題として残されている.

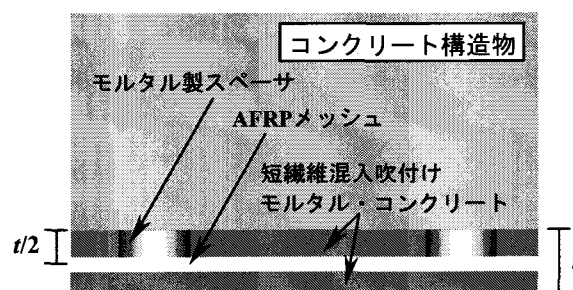


図-1 補強概要

著者らは, これらの課題を克服するために, アラミド繊維 (AFRP) 製メッシュを配置した上からビニロン短繊維を混入したモルタルやコンクリートを吹付ける工法 (図-1 参照) を提案し, その実用化に向けた種々の検討を行っている. 本工法は, 1) 鋼材を使用しないため補強材の防錆処理の必要が無く, 2) 特殊なセメントを用いないため施工が簡易であり材料費も安価である. また, 3) 補強材として用いている AFRP メッシュは, しなやかな特性を有しているため複雑な形状にも

表-1 試験体の一覧

試験体名	吹付け材			AFRP メッシュ			計算曲げ 耐力 (kN)	計算せん断 耐力 (kN)	せん断 余裕度 α
	種類	短繊維長 (mm)	吹付け厚 (mm)	保証耐力 (kN/m)	格子間隔 (mm)	層数			
M10-0	モルタル	6	10	-	-	-	86.0	181.5	2.11
M10-0.5				50	30	1	92.8		1.96
M10-1				100	30	1	100.0		1.82
M10-2				200	40	1	114.3		1.59
C30-0	コンク リート	30	30	-	-	-	86.0	181.5	2.11
C30-2				200	80	1	115.7		1.57
C30-4						2	145.4		1.25
C30-6						3	171.8		1.06

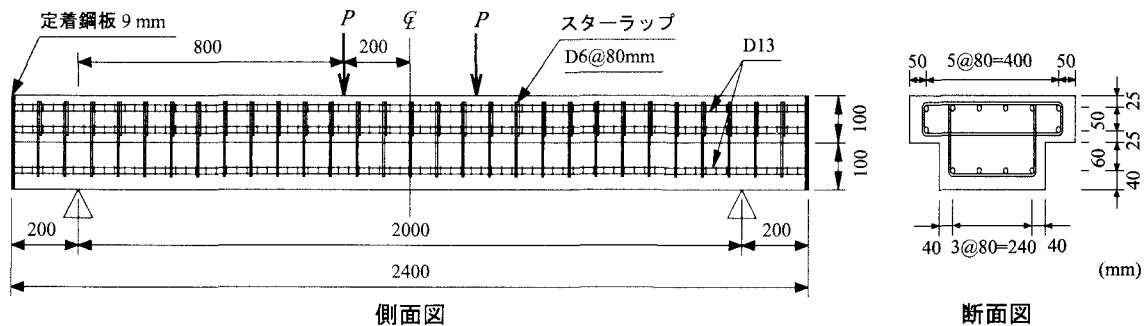


図-2 試験体の概要

追従することが可能であり、かつ、4) ロール状に巻き取ることができるため、運搬にかかる負担も低減できる、等の利点が挙げられる。これより、本工法はこれまでの諸工法の問題点を解決し、工期短縮および工費縮減に資することができる優れた工法の一つであるものと判断される。

これまでの研究では、本工法の施工性に関する検討の他、本工法がコンクリート片の剥落抑制効果や RC 床版の押し抜きせん断耐力の向上効果に対して有効であることを確認している⁴⁾。しかしながら、AFRP メッシュの効果によって RC 部材の曲げ耐力も十分向上可能であるものと考えられる。これより、より効率的な補強法を確立するためには、せん断耐力向上効果のみならず、曲げ耐力向上効果あるいは吹付け材および AFRP メッシュ (以後、これらを合わせて補強材と呼ぶ) の剥離と曲げ耐荷性状との関係について詳細な検討を行うことが必須であるものと判断される。

このような観点より、本研究では、提案の工法を RC 部材に適用した場合の曲げ補強効果と曲げ載荷時における補強材の剥離性状を明らかにすることを目的に、本工法を適用した曲げ補強 RC はりに関する静載荷実験を行った。本実験では、吹付け材として短繊維混入モルタルとコンクリートを用いる場合を設定し、AFRP

メッシュの補強量が RC はりの耐荷性状に及ぼす影響や、補強材の剥離と RC はりの曲げ耐荷性状の関係について検討を行った。

なお、本補強工法では、前述のように吹付け材としてモルタルとコンクリートを設定している。これは、以下のような補強目的に対応させるためである。すなわち、1) モルタル吹付けは、既設構造物のかぶりコンクリートの剥落の防止を目的とする場合等のように、メッシュ補強量が比較的少量で吹付け厚さが 30 mm 未満で十分の場合であり、2) コンクリート吹付けは、桁や床版の耐力向上を目的とする場合等のようにメッシュ補強量を多くしなければならない場合や、断面修復を併用し吹付け厚さが 30 mm 以上となる場合である。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表-1 には、本実験に用いた試験体の一覧を示している。試験体数は、吹付け材としてモルタルおよびコンクリートを用いる場合に対して、AFRP メッシュ補強量を 4 種類に変化させた全 8 体である。試験体名のうち、第 1 項目の M および C はそれぞれ吹付け材としてモルタルおよびコンクリートを用いたことを示し

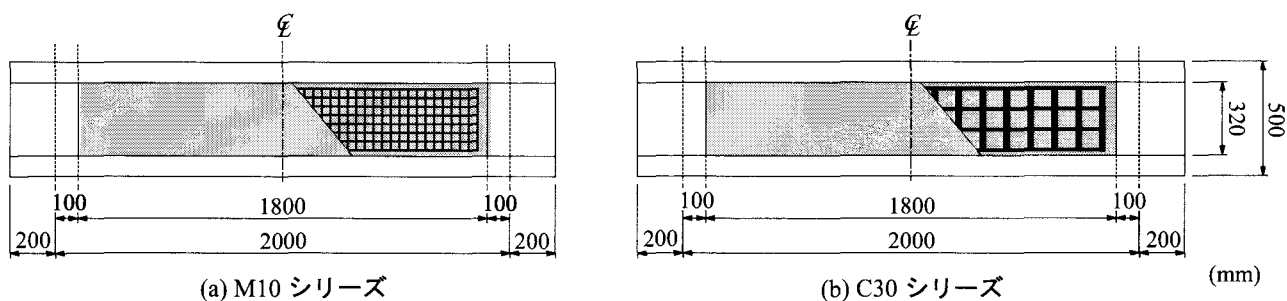


図-3 はり底面の補強概要

表-2 吹付け材に使用した材料の一覧

材料	記号	種類	物性および主成分
セメント	C	普通ポルトランドセメント	比重：3.14，比表面積：0.45 m ² /g
細骨材	S	苫小牧産海砂	比重：2.68，粗粒率：2.85
粗骨材	G	小樽産碎石	比重：2.68，最大寸法：10 mm
混和材	SF	中国産シリカフューム	比重：2.20，比表面積：19.1 m ² /g
混和剤	SP	高性能減水剤	ポリグリコールエステル誘導体
	AE	AE 剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
短繊維	V _f	ビニロン短繊維（外割配合）	図-5 参照

表-3 吹付け材の配合一覧

吹付け材 の種類	V _f (vol.%)	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C × %)		フロー 値	スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G	SF	SP	AE			
モルタル	1.5	39	225	655	1310	-	-	0.5	0.002	180	-	5.2
コンクリート		43	185	387	1365	340	43	2.5	-	-	5.8	6.0

$$B = C + SF$$

ており、それに付随する数値は、吹付け厚さ t (mm) を示している。また、第2項目は AFRP メッシュの補強量を意味しており、保証耐力 (kN/m) の 1/100 の数値を示している。なお、吹付け厚さは、モルタルおよびコンクリートを用いる場合に対して、それらの最小厚さとしてそれぞれ $t = 10, 30$ mm と設定している。

なお、本実験は、RC はりの曲げ補強効果に関する検討を行うことを目的としている。そのため、RC はりの設計は、曲げ補強後においてもせん断破壊しないように、計算せん断耐力 V_{uc} が計算曲げ耐力 P_{uc} よりも大きくなるように行っている。表-1 には、各試験体のせん断余裕度 $\alpha (= V_{uc}/P_{uc})$ を示している。ここで、計算せん断耐力は V_{uc} は、補強材の剛性を無視してコンクリート標準示方書⁵⁾ に準拠して算出している。また、計算曲げ耐力 P_{uc} は、補強材の完全付着および平面保持を仮定して、断面分割法により算出している。

P_{uc} の算出におけるコンクリートおよび鉄筋の応力-ひずみ関係は、後述の材料試験値を用い、コンクリート標準示方書に準拠して仮定した。また、AFRP メッシュに関しては、アラミド補強研究会の AFRP シート補強に関する指針⁶⁾ に準拠して、AFRP シートと同様にメッシュが破断するまで引張応力が線形的に

増大するものと仮定している。なお、本工法では、吹付けモルタルおよびコンクリートの剥落を抑制することを目的としてビニロン短繊維を混入していることより、吹付け材に混入した短繊維の引張性能は計算上考慮していない。

図-2 には、本実験に用いた RC はりの形状寸法および配筋状況を示している。試験体は、はり高 20 cm、ウェブ幅 32 cm、フランジ厚 10 cm およびフランジ幅が 50 cm の複鉄筋 T 型 RC はりであり、純スパン長は 2 m である。軸方向鉄筋には、D13 (SD295A) を用い、またスターラップには D6 (SD295) を用いて 80 mm 間隔で配置している。実験は、載荷点間隔 40 cm の 2 点載荷により行っているため、せん断スパン比は 5.0 となっている。

実験におけるコンクリートの材齢は 48 日であり、圧縮強度は 24.3 MPa であった。また、鉄筋の降伏強度は D6 および D13 でそれぞれ 402, 392 MPa であった。

2.2 補強概要

各試験体の補強は、前述の図-1 に示しているように、1) まず母材コンクリート表面の脆弱部の除去および吹付け材の付着性の向上を目的として、吹付け施

表－4 吹付け材の力学的特性値

吹付け 材の 種類	材 齢 (日)	圧縮 強度 (MPa)	弾性 係数 (GPa)	圧縮靱 性係数 (MPa)	曲げ 強度 (MPa)	曲げ靱 性係数 (MPa)
モルタル	33	62.3	29.9	49.3	5.6	2.9
コンク リート	27	95.8	36.6	46.1	8.4	2.6

工面にブラスト処理を施し、2) AFRP メッシュを設定吹付け厚 t の 1/2 の位置にモルタル製スペーサを介して配置し、3) 短繊維混入モルタルもしくはコンクリートを所定の厚さに吹付け、コテ仕上げすることにより行っている。なお、本実験では、吹付け施工に伴う各試験体のばらつきを極力小さくするために、モルタルおよびコンクリートの吹付けは、RC はりを 90 度回転させてはり底面を鉛直面とし施工しやすい条件下で実施することとした。また、実験終了後には、補強を施した各 RC はりの底面をコア抜きし、吹付け材が AFRP メッシュの裏側まで十分に充填されていることを確認している。

図－3 には、はり底面における補強概要を示している。補強範囲は、いずれの試験体の場合もはり中央部から両支点の 10 cm 手前までの範囲としている。また、AFRP メッシュとして、モルタル吹付けの場合には、保証耐力 50 ～ 200 kN/m、格子間隔 30 ～ 40 mm のものを用い、コンクリート吹付けの場合には、保証耐力 200 kN/m、格子間隔 80 mm のものを 1 ～ 3 層用いた。

2.3 吹付け材の配合および力学性能

表－2 には、吹付けモルタルおよびコンクリートに用いた材料の一覧を示している。また、表－3 には、吹付けモルタルおよびコンクリートの配合を一覧にして示している。モルタルおよびコンクリートの配合は、それぞれスクイズ式および空気圧送式吹付け機を用いて施工することを前提に決定している。そのため、これらの配合は、実際に吹付け試験を行って吐出性状を確認するとともに、コンクリートへの付着性および補強材として耐凍害性および耐塩分浸透性が十分なものとなるように決定した。なお、これらの吹付けモルタルおよびコンクリートは、別途実施した凍結融解試験および急速塩分浸透試験により十分な耐凍害性および耐塩分浸透性を有していることを確認している。また、本補強工法では、吹付け後における表面仕上げを可能にするため、急結材は使用していない。

表－4 には、短繊維混入モルタルおよびコンクリートの力学的特性値を示している。これらの試験に用いる供試体は、土木学会規準⁷⁾ (JSCE-F 561-1999) に準拠した吹付けコンクリート供試体製作用パネル (500 ×

表－5 ビニロン短繊維の形状寸法と材料特性値

吹付け 材の 種類	長さ l (mm)	直径 d (mm)	アスペ クト比 l/d	弾性 係数 (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 歪み (%)
モルタル	6	0.10	60	29.4	0.88	7.0
コンク リート	30	0.66	45			

表－6 AFRP メッシュの形状寸法と材料特性値

吹付け 材の 種類	保証 耐力 (kN/m)	格子 間隔 (mm)	弾性 係数 (GPa)	引張 強度 (GPa)	破断 歪み (%)
モルタル	50	30	118	2.06	1.75
	100	30			
	200	40			
コンク リート	200	80			

500 mm、深さ 300 mm、以後、単にパネル) に吹付けたモルタルおよびコンクリートを、硬化後に切り出して製作した。供試体製作用パネルの深さは、上述のとおりに 300 mm であり、吹付け材の RC はりへの吹付け厚 (10 もしくは 30 mm) よりも著しく大きい。理想的には、はり製作時と同様の姿勢の下にパネルへの吹付けを実施するべきである。しかしながら、吹付けノズルを水平にし、かつパネルを直立させて 300 mm 厚のブロックを製作することは、材料の自重による下方流動を伴うため困難である。従って、本研究では、モルタルの場合にはパネルを地表面に設置してノズルを下向きに、またコンクリートの場合には、パネルを地表面に対して 60 度に傾斜させてノズルを斜め下向きにして吹付けを実施することとした。

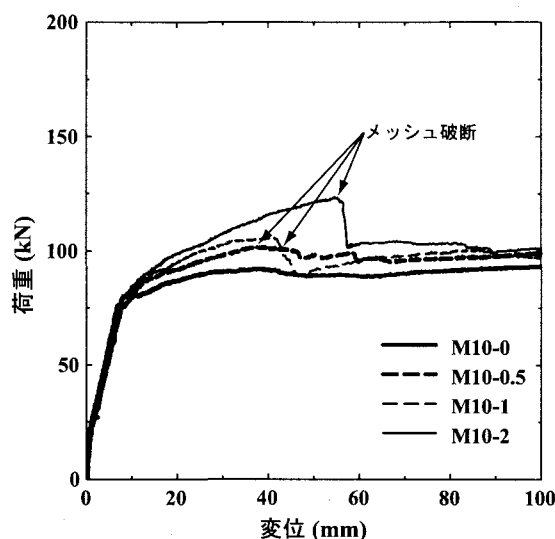
2.4 各種補強材料の形状寸法と材料特性値

表－5, 6 には、それぞれ ビニロン短繊維および AFRP メッシュの形状寸法と材料特性値の一覧を示している。なお、ビニロン短繊維には、市販されている汎用的なものを用いることとした。また、その長さは、モルタルおよびコンクリートの吹付け厚さを考慮して、それぞれ 6, 30 mm と設定した。AFRP メッシュの格子間隔は、使用するビニロン短繊維よりも十分に大きくなるように表－6 のように設定した。

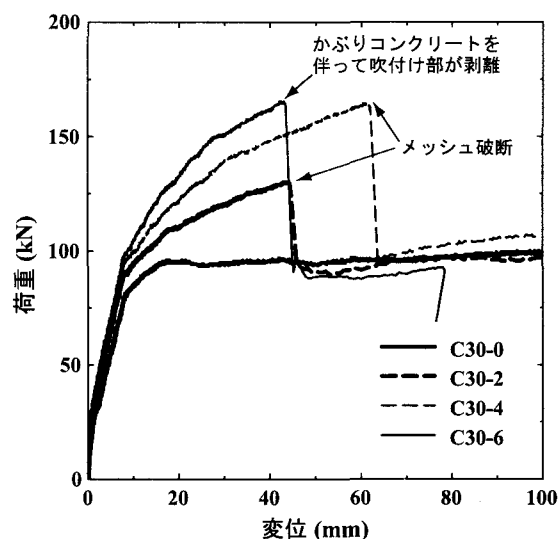
3. 実験結果

3.1 荷重－変位曲線

図－4 には、各試験体の荷重－変位曲線に関する



(a) M10 シリーズ



(b) C30 シリーズ

図-4 荷重-変位曲線 (メッシュ補強量の影響)

実験結果を吹付け材の種類毎に整理して示している。図-4(a)の吹付けモルタルを用いた M10 シリーズの結果より、AFRP メッシュを配置していない M10-0 試験体は、主鉄筋降伏後も顕著な荷重増加は見られないことが分かる。メッシュを配置した M10-0.5/1/2 試験体の場合には、曲げひび割れ発生後から主鉄筋降伏前までの剛性勾配 (以後、第 2 勾配) が、いずれの試験体もほぼ同様の性状を示しているものの、主鉄筋降伏後の剛性勾配 (以後、第 3 勾配) や最大荷重および最大荷重時変位は、メッシュ補強量の増加に伴って大きくなる傾向にあることが分かる。

実験時において、M10-0.5 試験体の場合には、最大荷重到達後スパン中央部近傍の AFRP メッシュがはり幅方向に段階的に破断して荷重が徐々に低下し、変位 70 mm 程度で全幅に渡って完全に破断した。なお、AFRP メッシュが破断する場合には常に軸方向繊維のみが破断していることより、以下ではこれらの状況を単に「メッシュの破断」として簡略化して記述することとする。M10-1 試験体の場合には、最大荷重到達後、変位 50 mm 程度でメッシュが全幅に渡って完全に破断している。一方、M10-2 試験体の場合には、最大荷重到達後、荷重が急激に 25 kN 程度低下するものの、メッシュは完全には破断に至らず、その後メッシュが段階的に破断するとともに荷重が徐々に低下し、変位 90 mm 程度で完全に破断した。

なお、上記補強試験体の結果より、AFRP メッシュ補強量が多い場合ほど荷重が急激に低下する傾向が強く現れている。これは、メッシュ補強量が少ない場合 (M10-0.5/1 試験体) には、上縁コンクリート圧壊後、等曲げ区間における曲げひび割れの大きな開口に伴って複数の位置で軸方向繊維が逐次的に破断するため、徐々に荷重が低下する性状を示しているのに対して、

メッシュ補強量が多い場合 (M10-2 試験体) には、曲げ補強量が多いことにより、はりが大きく曲げ変形するものの、やがて等曲げ区間のメッシュが破断ひずみに至り荷重が急激に低下したためと考えられる。このような傾向は、M10-2 試験体に比較してメッシュ補強量が同等以上である C30-2/4/6 試験体の場合においても同様である。

図-4(b)の吹付けコンクリートを用いた C30 シリーズの結果より、メッシュを配置していない C30-0 試験体は、前述の M10-0 試験体と同様、主鉄筋降伏後における顕著な荷重増加は示されていないことが分かる。メッシュを配置した C30-2/4/6 試験体の場合には、第 2 勾配が C30-0 試験体の場合よりも若干大きくなっているものの、メッシュ補強量による違いは顕著ではない。また、第 3 勾配および最大荷重は、M10 シリーズの場合と同様、メッシュ補強量の増加に伴って大きくなる傾向にあることが分かる。しかしながら、最大荷重時変位は、メッシュ補強量が最も大きい C30-6 試験体の場合が最も小さくなっている。さらに、メッシュ補強量の増加による最大荷重の増分も小さい。これは、後述の破壊性状にも示されているように、C30-2/4 試験体の場合には、最大荷重時にメッシュが全幅に渡って完全に破断して終局に至ったのに対し、C30-6 試験体の場合には、吹付けコンクリート部がかぶりコンクリートを付着させた状態で端部から剥離したため、メッシュの引張耐力が十分に発揮されなかったことによるものと考えられる。

ここで、各試験体の主鉄筋降伏後の第 3 勾配に着目すると、C30-4/6 試験体のように補強量が多い場合ほど主鉄筋降伏後の勾配は大きく示されているものの、その後変位 30 mm 程度において勾配が低下している。これは、補強材と RC はりのコンクリート表面との付

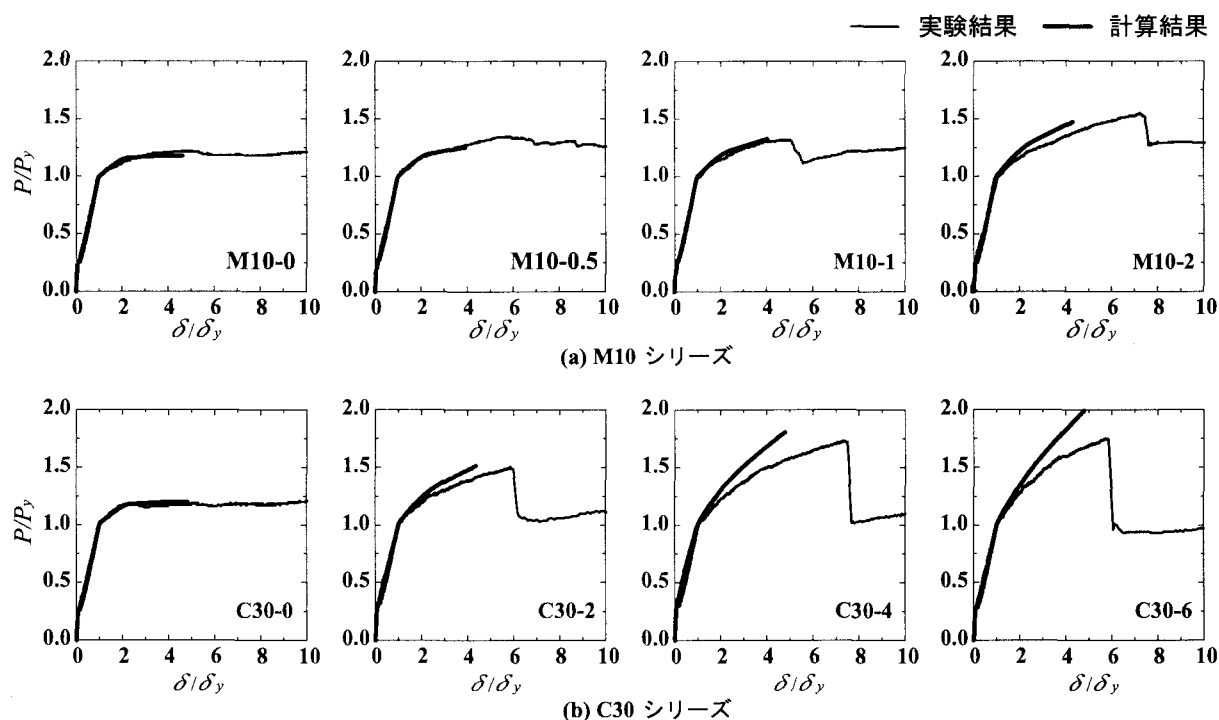


図-5 荷重－変位曲線に関する実験および計算結果の比較

表-7 実験および計算結果の一覧

試験 体名	実験結果						計算結果					
	荷重			変位			荷重			変位		
	降伏 P_{ye} (kN)	終局 P_{ue} (kN)	P_{ue}/P_{ye}	降伏 δ_{ye} (mm)	終局 δ_{ue} (mm)	δ_{ue}/δ_{ye}	降伏 P_{yc} (kN)	終局 P_{uc} (kN)	P_{uc}/P_{yc}	降伏 δ_{yc} (mm)	終局 δ_{uc} (mm)	δ_{uc}/δ_{yc}
M10-0	75.5	93.6	1.24	7.94	101.4	12.8	73.1	86.0	1.18	6.7	30.9	4.60
M10-0.5	75.5	101.7	1.35	6.80	40.00	5.88	74.1	92.8	1.25	6.7	26.0	3.90
M10-1	80.0	105.6	1.32	8.28	41.38	5.00	75.4	100.0	1.33	6.8	27.2	4.02
M10-2	79.9	123.6	1.6	7.6	54.6	7.23	77.7	114.3	1.47	6.8	29.3	4.31
C30-0	81.2	100.4	1.23	8.34	103.4	12.40	73.1	86.0	1.18	6.7	30.9	4.60
C30-2	86.7	130.6	1.51	7.43	43.5	5.86	76.4	115.7	1.52	6.4	28.0	4.36
C30-4	94.8	164.5	1.73	8.28	61.1	7.38	80.5	145.4	1.80	6.4	30.8	4.79
C30-6	94.3	165.5	1.75	7.42	43.1	5.81	86.3	171.8	2.00	6.6	31.6	4.80

着界面が部分的な剥離を生じていることを暗示している。従って、以下の考察では、各試験体の荷重－変位曲線の第3勾配に着目し、補強材の完全付着を仮定した断面分割法による計算結果と比較することにより、主鉄筋降伏後における補強材の付着状況を検討することとする。

図-5には、各試験体の荷重－変位曲線に関する実験結果を計算結果と比較して示している。ここで、図に示している荷重および変位の結果は、実験および計算結果における主鉄筋の降伏荷重 P_{ye} , P_{yc} , 降伏変位 δ_{ye} , δ_{yc} で除して無次元化して示されている。これは、主鉄筋降伏後におけるAFRPメッシュの曲げ補強効果

に関する実験結果を計算結果と比較しやすくするためである。表-7には、参考のため、各試験体の実験および計算結果の一覧を示している。なお、計算では、いずれの試験体もAFRPメッシュの破断により終局に至っている。表より、実験結果の降伏荷重および降伏変位は、いずれも計算結果を上回っていることが分かる。そのため、実験結果は無次元化することによって計算結果よりも小さく評価される。従って、無次元化後における実験結果の計算結果に対する比較は、設計的に安全側の評価を与えるものと考えられる。

図より、メッシュを配置していないM10/C30-0試験体は、ともに計算結果と同様の性状を示していること

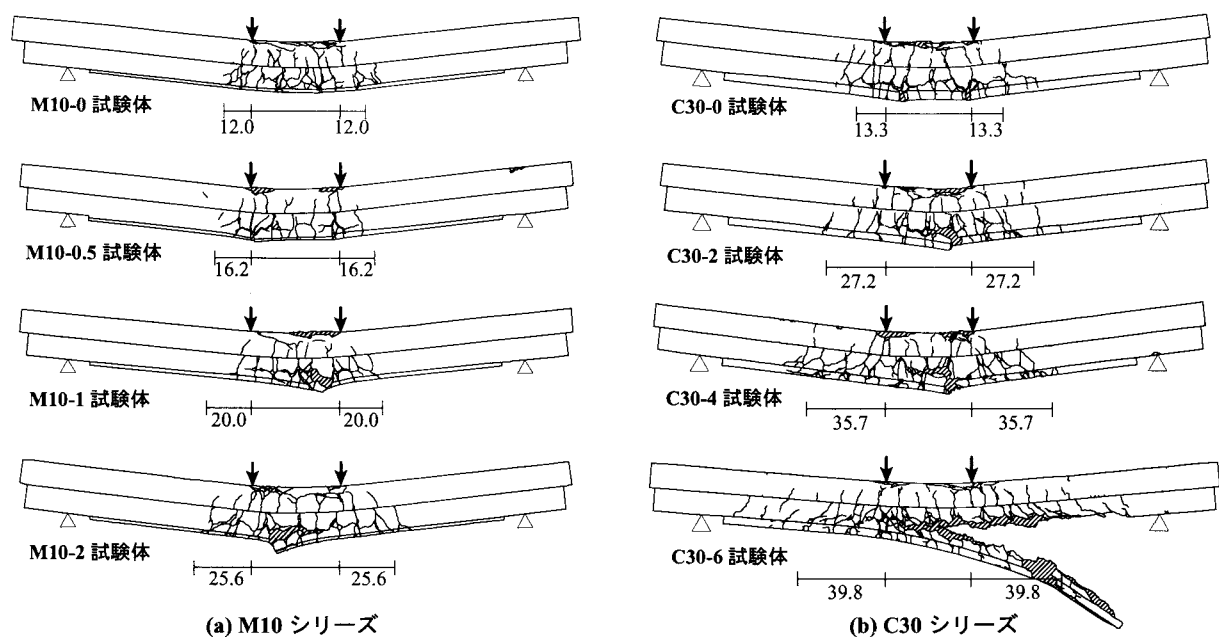


図-6 ひび割れ分布比較図

が分かる。また、メッシュを配置した試験体のうち、補強量の小さい M10-0.5/1 試験体の場合には、計算最大荷重時まで実験および計算結果が良く対応している。これは、両試験体に吹付けたモルタルがメッシュ破断時までほぼ完全付着状態にあることを示している。また、メッシュ補強量が同等である M10/C30-2 試験体の結果を見ると、実験結果の第3勾配が、 $\delta/\delta_y = 2 \sim 3$ 程度以降で計算結果のそれを若干下回る傾向にあることが分かる。

一方、M10/C30-2 試験体よりも補強量が多い C30-4/6 試験体の場合には、 $\delta/\delta_y = 2$ 程度までは、実験結果の第3勾配が計算結果のそれとほぼ対応しているものの、それ以降は徐々に実験結果が計算結果を下回る傾向にあることが分かる。また、両試験体ともに、計算最大荷重到達前に終局に至っている。これらは、RC はりのコンクリート表面と吹付けモルタル/コンクリートとの付着界面が部分剥離に至っていることによるものと推察される。

以上のことより、メッシュ補強量が同等の場合には、吹付け材の種類によらずほぼ同様の耐荷性状を示すことが明らかになった。また、メッシュ補強量が大きい場合ほど、実験結果の第3勾配が計算結果のそれを下回る傾向が強く現れることが明らかになった。

3.2 ひび割れ分布性状

図-6 には、各試験体の実験終了後におけるひび割れ分布性状を示している。また、図には、計算最大荷重時における主鉄筋降伏範囲を示している。なお、等せん断力区間の主鉄筋の降伏範囲 L_{yu} は、文献 8) を参考にして式 (1) により算定した。すなわち、

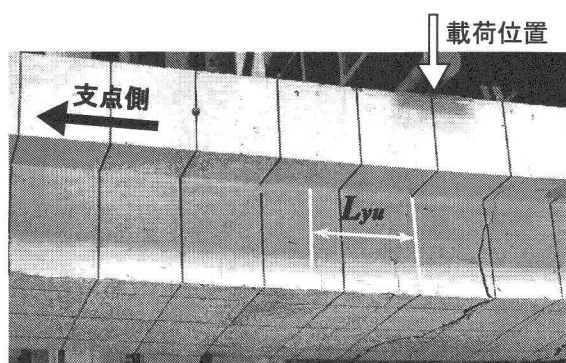
$$L_{yu} = a(1 - M_y/M_u) \quad (1)$$

ここに、 a : せん断スパン長、 M_y : 断面分割法による主鉄筋降伏曲げモーメント、 M_u : 断面分割法による終局曲げモーメント、である。ここで、 L_{yu} に着目したのは、著者らによる FRP シート曲げ補強 RC はりの静載荷実験⁸⁾の結果より、 L_{yu} の大きさが曲げ補強シートの剥離性状と密接に関連していることが明らかになっていることによるものである。

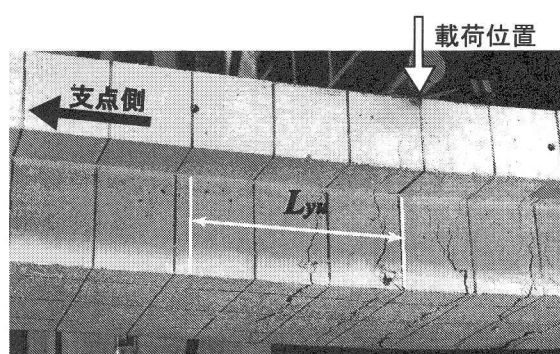
図より、M10/C30-0 試験体の場合には、主に曲げひび割れが発生しており、等曲げ区間ではそのひび割れが大きく開口していることが分かる。M10-0.5/1 試験体の場合も、M10/C30-0 試験体と同様、曲げひび割れの発生が多く見られ、いずれも等曲げ区間に曲げひび割れの大きな開口が見られる。また、メッシュ補強量が同等の M10/C30-2 試験体の場合には、ひび割れの発生範囲がほぼ同様であり曲げひび割れの他、等せん断力区間には斜めひび割れの発生が見られる。ただし、両試験体ともに、メッシュの破断により終局に至っているため、等曲げ区間において大きなひび割れの開口が見られる。

C30-4 試験体の場合には、C30-2 試験体よりも等せん断力区間における斜めひび割れの発生範囲が支点側に拡大していることが分かる。なお、実験では、等せん断力区間に数本の斜めひび割れが開口した後、吹付け部界面近傍において水平方向にひび割れが進展していることを確認している。また、等曲げ区間にはメッシュの破断に伴うひび割れの開口が見られる。

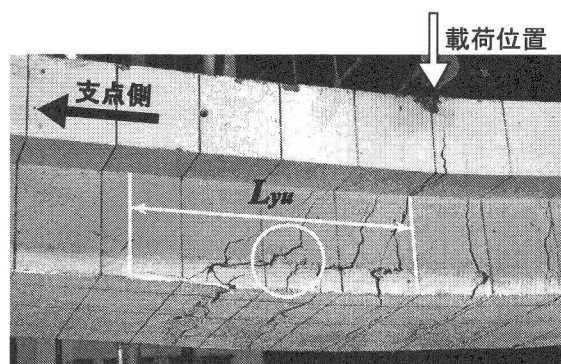
C30-6 試験体の結果を見ると、他の試験体とは大きく異なり、右側スパンにおいて、主鉄筋配置位置を境に



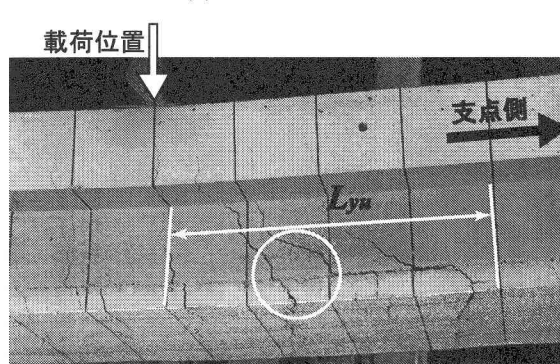
(a) C30-0 試験体



(b) C30-2 試験体



(c) C30-4 試験体



(d) C30-6 試験体

写真-1 最大荷重時近傍のひび割れ性状

吹付けコンクリートが下縁かぶりコンクリートとともに剥離していることが分かる。これは、C30-6 試験体のメッシュ補強量が最も大きいことから、最大荷重時にひび割れ発生範囲が補強範囲の端部まで拡大し、結果的に端部に発生した曲げひび割れに起因して補強材が引き剥がされるピーリング作用により剥離がスパン中央部に進展したためと考えられる。このことから、本実験に用いた吹付けコンクリートの付着性能は、母材コンクリートの引張強度以上に大きいことが推察される。

一方、各試験体の主鉄筋降伏範囲は、メッシュ補強量が大きい場合ほど広く示されており、ひび割れの発生範囲もほぼ同様の傾向を示していることが分かる。特に、等せん断力区間では、はり下縁かぶりコンクリート部に発生した斜めひび割れと曲げひび割れが交差してコンクリートブロックが形成されていることが分かる。なお、C30-6 試験体は、他の試験体と異なり、ひび割れが主鉄筋降伏範囲よりも広い範囲に分布する傾向が強く現れている。これは、C30-6 試験体の場合は、吹付けコンクリートがピーリング作用によりはりのかぶりコンクリートを引き剥がす形で終局に至っているためと考えられる。

3.3 吹付け材の剥離メカニズム

写真-1 には、吹付け材の剥離に影響を及ぼすひび割れを詳細に検討するために、最大荷重時近傍におけ

る等せん断力区間のひび割れ分布性状を C30 シリーズについて示している。写真より、C30-0 試験体の場合には、等曲げ区間において曲げひび割れが大きく開口しているものの、等せん断力区間には著しいひび割れの発生は見られない。C30-2 試験体の場合には、等曲げ区間のみならず等せん断力区間にもひび割れが発生している。なお、これらのひび割れは吹付けコンクリート部からはり底面にかけて連続的に進展していることより、吹付けコンクリートの付着は確保されているものと判断される。

これらに対し、C30-4/6 試験体の場合には、等せん断力区間において斜めひび割れが多く発生し、かつはり底面と吹付けコンクリートの界面には、部分的な剥離が生じていることが分かる。また、その範囲は主鉄筋降伏範囲 L_{yu} とほぼ対応している。また、実験時には、はり下縁かぶり部に形成されたコンクリートブロック(写真中、○印)が吹付けコンクリートを押し出す形で部分剥離を生じさせていることを確認している。このような補強材の剥離挙動は、FRP シート曲げ補強 RC はりの静載荷実験で見られるピーリング作用と同様なものであると考えられる。なお、写真からも分かるように、部分剥離先端部では、吹付け界面近傍の水平ひび割れが吹付けコンクリート部の斜めひび割れに進展しており、FRP シート接着の場合のように部分剥離範囲が支点側に急激に進展する剥離性状は見られない。これは、AFRP メッシュの曲げ剛性が小さく撓化性が

あるため、ピーリング作用によるメッシュを介しての支点方向への力の伝達が緩和されたことによるものと推察される。このことより、部分剥離発生後における全面剥離に対する抵抗性は、本工法が FRP シート接着工法よりも優れているものと考えられる。

以上のことから、前述の荷重－変位曲線に見られた第3勾配の低下は、等せん断力区間における吹付けコンクリートの部分剥離によるものであることが明らかになった。また、この部分剥離には、主鉄筋降伏範囲のはり下縁かぶり部に形成されるコンクリートブロックによるピーリング作用が大きな影響を及ぼしているものと推察される。さらに、ピーリング作用の要因となる下縁かぶりコンクリート部の斜めひび割れは、主鉄筋降伏範囲内に発生することから、吹付けコンクリート部の剥離には、FRP シート曲げ補強の場合と同様、主鉄筋の降伏範囲が大きく影響しているものと推察される。

4. 曲げ補強後の RC はりの破壊形式の予測

本実験結果では、図－5 の荷重－変位曲線からも分かるように、メッシュ補強量の違いによって無次元化後の実測耐力が計算耐力を十分に満足する場合と実測耐力が計算耐力を下回る場合が見られた。前者の場合には、断面分割法に基づいた数値計算により最大荷重を評価可能であるが、後者の場合には、計算結果が実測値を過大に評価し危険側の設計になる可能性がある。

一方、著者らの過去の研究⁸⁾では、FRP シート曲げ補強 RC はりの破壊形式を、1) 計算終局時までシートが剥離せずに実測耐力が計算耐力を上回った後上縁コンクリートが圧壊して終局に至る「曲げ圧壊型」と、2) 計算終局時到達前にシートが剥離して実測耐力が計算耐力を下回って終局に至る「剥離破壊型」に分類して、破壊形式予測式を提案している。この予測式では、シートの剥離が計算終局時における等せん断力区間の主鉄筋降伏領域 L_{yu} と深く関連していることに着目して、以下のような L_{yu} とせん断スパン長 a を用いた破壊形式予測式を提案している。すなわち、

曲げ圧壊型の場合は、

$$L_{yu}/a < 0.30 \quad (2)$$

剥離破壊型の場合は、

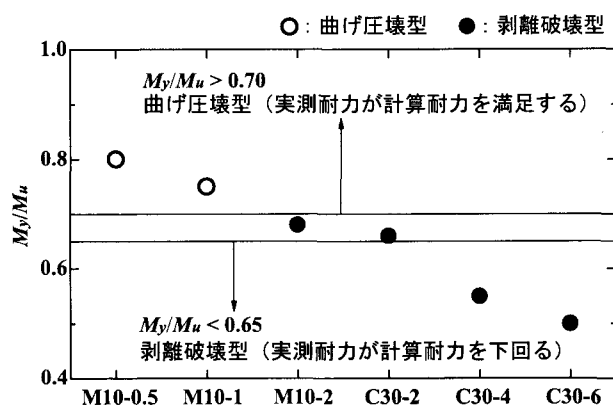
$$L_{yu}/a > 0.35 \quad (3)$$

である。

また、式 (2), (3) は、前述の式 (1) を用いると、計算降伏曲げモーメント M_y および計算終局曲げモーメント M_u を用いて下式のように変形できる。すなわち、

曲げ圧壊型の場合は、

$$M_y/M_u > 0.70 \quad (4)$$



図－7 各試験体の M_y/M_u 値

剥離破壊型の場合は、

$$M_y/M_u < 0.65 \quad (5)$$

である。

図－7 には、上記の破壊形式予測式の本実験結果への適用性について検討するため、各補強試験体の M_y/M_u 値と、実験結果の破壊形式を区別して整理している。図より、メッシュ補強量が少ない M10-0.5/1 試験体の場合には、曲げ圧壊型と判定され、かつ実験結果も曲げ圧壊型で終局に至っていることが分かる。

一方、メッシュ補強量が多い C30-4/6 試験体は、剥離破壊型と判定されている。実験結果も、計算耐力到達前にピーリング作用による吹付け材の部分剥離により主鉄筋降伏後の第3勾配が計算結果を大きく下回り補強材の破断もしくは剥離により終局に至っている。

M10/C30-2 試験体の場合には、ともに両破壊形式の遷移領域に位置している。実験時には、計算終局耐力を確保しているものの実験結果の第3勾配が計算結果のそれを若干下回る傾向にあり、予測式と同様曲げ圧壊型と剥離破壊型の間隔的な性状を示していることが分かる。なお、図中では、設計的に安全側の評価を与えるように剥離破壊型として分類している。

以上より、本工法は FRP シート接着工法と同程度の曲げ補強効果を有しており、かつその破壊形式の予測式は、本工法にも適用可能であることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、RC 部材の引張部を AFRP メッシュとビニロン短繊維混入吹付けモルタル／コンクリートを併用して補強した場合における曲げ補強効果や補強材の剥離性状を明らかにすることを目的として、本工法を適用した曲げ補強 RC はりに関する静載荷実験を行った。本実験では、吹付け材として短繊維混入モルタルもしくはコンクリートを用いる場合について、AFRP

メッシュの補強量が RC はりの曲げ耐荷性状に及ぼす影響や、補強材の剥離と RC はりの曲げ耐荷性状との関係について検討を行った。本研究で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 本工法による、AFRP メッシュの RC はりの曲げ補強効果は、FRP シート接着の場合とほぼ同等である。
- 2) メッシュ補強量が同等の場合には、吹付け材の種類によらずほぼ同様の耐荷性状を示す。また、メッシュ補強量が多い場合ほど、吹付け材の部分剥離が顕在化し主鉄筋降伏後の荷重－スパン中央部変位勾配が計算結果のそれを下回る傾向が強く現れる。
- 3) 補強材の剥離は、FRP シート接着の場合と同様、主鉄筋降伏範囲の下縁かぶりコンクリート部に形成されるコンクリートブロックが吹付け材を押し出して引き剥がすピーリング作用によって発生する。ただし、部分剥離発生後における全面剥離に対する抵抗性は、本工法の方が FRP シート接着工法よりも優れている。
- 4) 補強材の剥離挙動は、曲げ補強 FRP シートの場合と類似していることより、本工法で曲げ補強した RC はりの破壊性状は、既往の FRP シート曲げ補強 RC はりの破壊形式予測式により、大略予測可能である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の補強指針 (案), コンクリートライブラリー 95, 1999
- 2) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, 2000.
- 3) 高瀬誠司, 小玉克巳, 栗原哲彦, 佐藤貢一：補修・補強材料としてのポリマーセメントモルタルの付着性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.319-324, 2003.
- 4) 栗橋祐介, 田口史雄, 三上 浩, 岸 徳光：短繊維混入吹付けモルタルとアラミド繊維メッシュを併用した補修・補強工法の開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 2 巻, pp.7~14, 2002.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.
- 6) アラミド補強研究会：AFRP シートによる RC 橋脚の補強設計要領
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準, 2002.
- 8) 岸 徳光, 三上 浩, 栗橋祐介：AFRP シートで曲げ補強した RC 梁の曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.47-64, 2001.8

(2003 年 9 月 12 日受付)